CONSOLIDACION DE ESTRUCTURAS DE MADERA

Por: ***Francisco Arriaga Martitegui.*** Arquitecto

INTRODUCCION.

Uno de los métodos más aceptable para la rehabilitación estructural de la madera deteriorada, se basa en la aplicación a la madera de la tecnología de las resinas epoxi. Consiste en la instalación de elementos de refuerzo dentro de la madera embebidos en formulaciones epoxídicas.

En esta técnica se reúnen básicamente tres materiales: la propia madera, el material del refuerzo (Resina reforzada con fibra de vidrio. metales. bien en forma de barras o de placas) y la resina epoxi, con una gran resistencia en la unión de materiales, ya sean de naturaleza polar o no, y una muy baja retracción.

Una formulación epoxi es una combinación de ingredientes, entre los que al menos figurará la resina epoxi y el endurecedor, con la finalidad de obtener, un producto con unas características lo más adecuadas posible a su empleo. A continuación se desglosan los componentes principales:

— Resina y endurecedor: Son líquidos con mayor o menor viscosidad, que se presentan en envases separados. Cuando ambos ingredientes se mezclan, la resina se polimeriza, y el conjunto se vuelve sólido. El volumen de la resina endurecida es el mismo que el de los dos ingredientes líquidos.

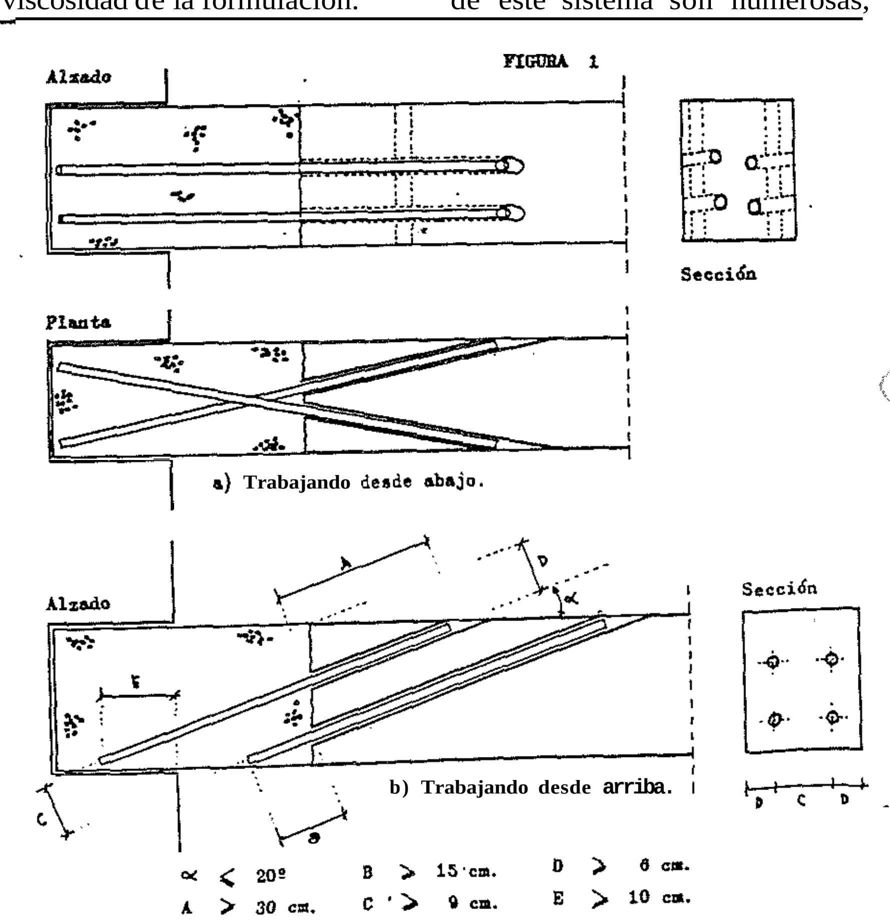
— Cargas: Son materiales inertes, y que por tanto no reaccionan con los componentes de la formulación. Reducen el costo como consecuencia de la disminución del porcentaje de resina y mejoran alguna de sus propiedades. Deben estar limpias, secas y libres de polvo, arcilla, sales o cualquier otro contaminante. Suelen emplearse: arena, gravilla, polvo de cuarzo, etc.

Para aplicar formulaciones sobre paramentos inclinados o lugares en los que por gravedad se descolgarían, se recurre a unas determinadas cargas llamadas agentes tixotrópicos que aumentan la viscosidad de la formulacion.

— Flexibilizadores: Son productos que se introducen en el sistema con el fin de aumentar su flexibilidad. Se pueden emplear para disminuir las tensiones debidas a los diferentes coeficientes de dilatación térmica del compuesto epoxi y los materiales en

2. APLICACIONES.

Las posibilidades de aplicación de este sistema son numerosas,



y la solución más adecuada a cada problema será diferente según los condicionantes de la situación. A continuación se comentan las aplicacibnes más comunes en estructuras de madera:

2.1. Estructuras horizontales:

Se trata del caso más frecuente, en edificios con forjados de viguería de madera. Después veremos como en elementos de cubierta se aplican soluciones similares a estas.

2.1.1. Consolidación de cabezas de vigas:

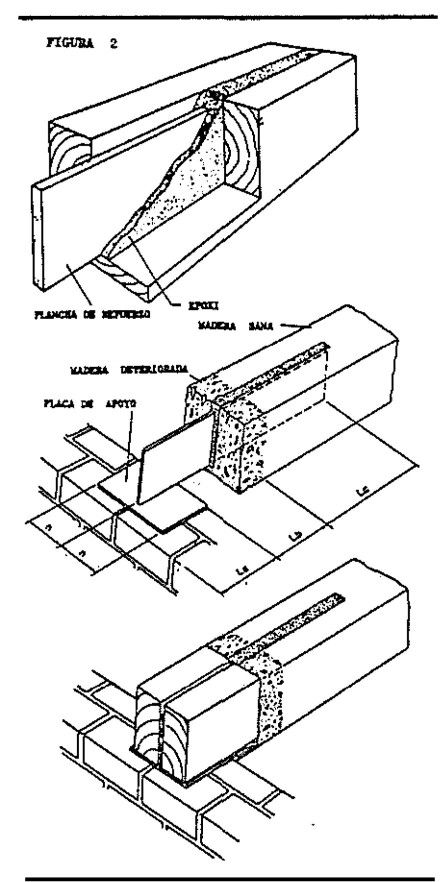
El lugar más expuesto a la degradación de la madera de un forjado, es precisamente la cabeza de la viga. Sobre todo si el muro de apoyo es de cerramiento o bien existen canalizaciones de agua próximas. Así como en el caso de un ataque de termitas también podemos esperar que los mayores daños estén en las cabezas, ya que al subir por los muros es el punto por donde comienzan el ataque. Dado que la humedad permite la actuación de los hongos de pudrición y favorece el desarrollo de las termitas es normal encontrar ambos fenómenos a la vez.

Si la sección no está debilitada hasta el extremo de haber perdido el apoyo con seguridad en el muro, puede reconstruirse la zona perdida con un mortero epoxi. conectándose a la madera sana con algún elemento embebido en resina.

En el caso contrario a la recuperación de la resistencia necesaria, según los procedimientos siguientes:

– Utilizando varillas o barras como elemento de refuerzo: Se cortará la parte degradada hasta llegar a la madera sana, sustituyéndose por un mortero epoxi. La conexión entre ambos se realiza mediante las varillas ancladas en la madera sana y el mortero. (Ver figura 1).

– Utilizando placas: En este caso la placa o placas de refuerzo pueden calcularse para resistir por ellas mismas las solicitaciones de la pieza en esa sección, y anclarse a la madera sana en



una longitud determinada. (Ver figura 2).

2.1.2. Consolidación de discontinuidades en vigas:

A veces se presenta el caso de un forjado con alguna de sus vigas partidas y cedidas, o bien. ensambles defectuosos, con elementos metálicos, o pudriciones en el vano de la viga.

2.1.3. Actuaciones en toda la longitud de la viga:

La mayoría de las maderas utilizadas en las antiguas construcciones eran resistentes y. sanas, y con arreglo a la clasificación actual se podrían considerar como de clase 0,75.

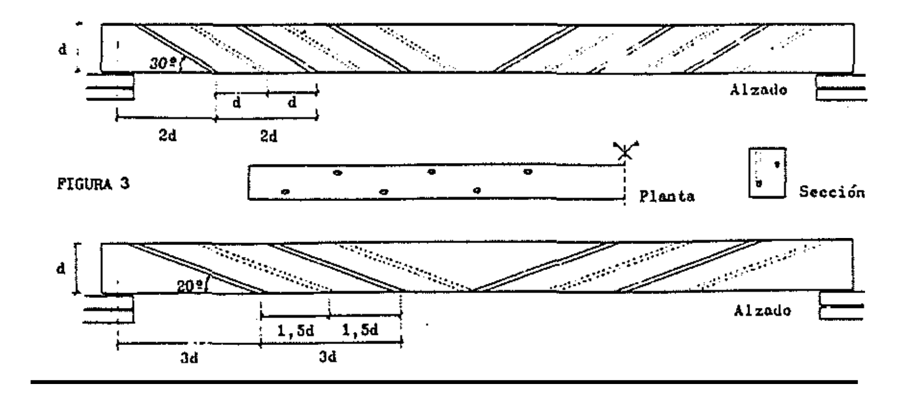
A lo largo del tiempo y muchas veces introducida la calefacción, esta maderas se han secado casi completamente, lo que supone una mejora de sus características mecánicas. Pero desgraciadamente este proceso de secado produce grandes fendas y rajas que al tenerlas en cuenta en su clasificación nos resultará una clase del 0,60 e incluso del 0,40.

La elevación del grado de calidad se puede conseguir mediante la introducción de varillas inclinadas dentro de los agujeros taladrados con este fin. (Ver figura **3).** La holgura entre varilla y agujero se rellena con resina. De esta forma absorberán los esfuerzos de cortadura, y se rellenarán de resina los huecos dejados por las fendas y rajas.

2.1.4. Aumento de la sección de una viga con el suplemento de madera nueva:

Cuando la sección de la viga es insuficiente para las condiciones de carga y deformación exigidas puede aumentarse el canto de la misma con un suplemento de madera unida con epoxi. Para rellenar con epoxi los posibles defectos de la madera se efectúan taladros donde se alojan varillas de refuerzo. (Ver figura 4).

Este método tiene el inconveniente de elevar el nivel del suelo y de modificar la apariencia exterior de la viga, por lo



que se limitará su aplicación a aquellos casos donde esto no sea importante.

2.2. Estructuras de cubierta:

En las formas de cubierta nos encontraremos con elementos que descansan en los muros, como pueden ser: pares, tirantes, jabalcones, etc. Por encontrarse en lugares favorables a la humedad presentarán daños similares a los ya comentados en las cabezas de vigas. Igualmente pueden presentarse piezas partidas, generalmente pares. Las soluciones serán del mismo tipo que las referidas para el caso anterior de vigas, teniendo en cuenta las solicitaciones a que está sometida, y las posibilidades de ejecución de la operación, que seran diferentes.

Las aplicaciones más características en estructuras de cubierta se presentan en la reparación de los nudos de las formas. Son lugares donde puede retenerse el agua de filtraciones y dar lugar a pudriciones, y así convertirse en un punto débil de la estmctura.

Las soluciones que se muestran en la figura 5 consisten en el cosido de las piezas con barras de refuerzo, y la reconstmcción de la madera perdida con mortero epoxi.

2.3. Estructuras verticales:

Este sistema permite también la rehabilitación de miembros estmctwales con cargas axiales, de compresión o tracción. Es frecuente el caso de columnas o pies derechos que al estar en contacto o proximidad con el terreno han sufrido ataques xilófagos que deterioran la pieza. Podemos reconstruir la parte perdida, una vez colocados los refuerzos, por medio de un mortero epoxi.

Si las condiciones de trabajo nos permiten realizar taladros, el refuerzo de varillas quedará oculto. Si no fuera posible, iremos a la solución de rozas o ranuras en su perímetro. El diámetro de los taladros o las dimensiones del ranurado deben ser lo suficientemente amplias para dejar un espacio de 3 a 6 mm., alrededor de toda la barra, que se llenará con epoxi.

Naturalmente son posibles otras configuraciones dependiendo de las circunstancias particulares.

3. EJECUCION.

Esquemáticamente podemos distinguir las principales operaciones para la ejecución de los trabajos de consolidación en cabezas de vigas, según empleemos barras o placas de refuerzo,, en las figuras 9 y 10 respectivamente.

Una vez apeada la estructura procederemos de la siguiente forma:

— FIGURA 6:

A.— Corte ,de la parte degradada de la cabeza, con sierra de cadena.

B.— Taladrado de agujeros.

C.— Instalación de las barras.

D.— Montaje del encofrado.

E.— Vertido del mortero epoxi en el encofrado.

F.— Vertido de resina epoxi en los agujeros de las barras.

— FIGURA **7:**

A.— Señalización del lugar donde irá el refuerzo.

B.— Ranurado con sierra circular para servir de guía.

C.— Realización del cajeado para alojar la placa. Con sierra

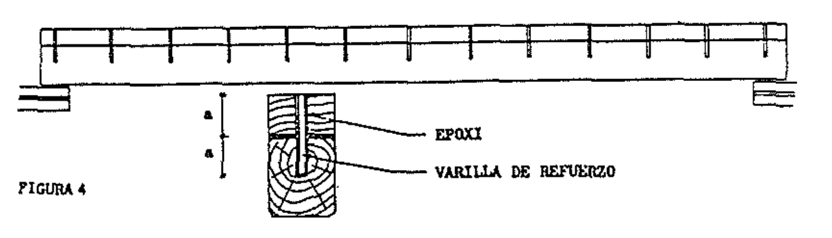
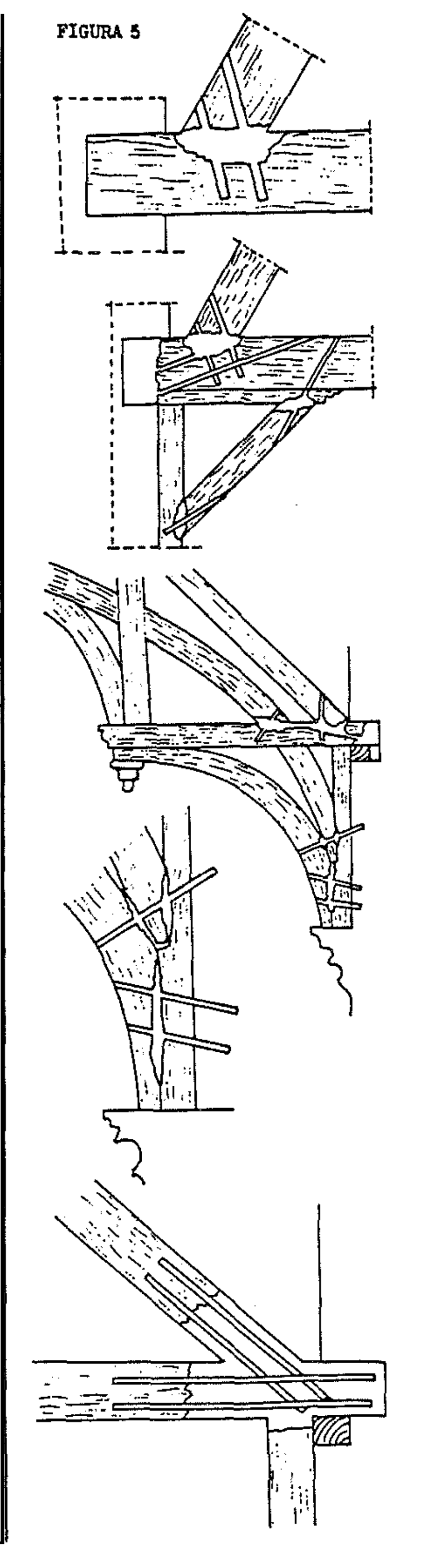


FIGURA 4


FIGURA 5

de cadena provista de tope de profundidad.

D.— Vertido parcial de la resina epoxi.

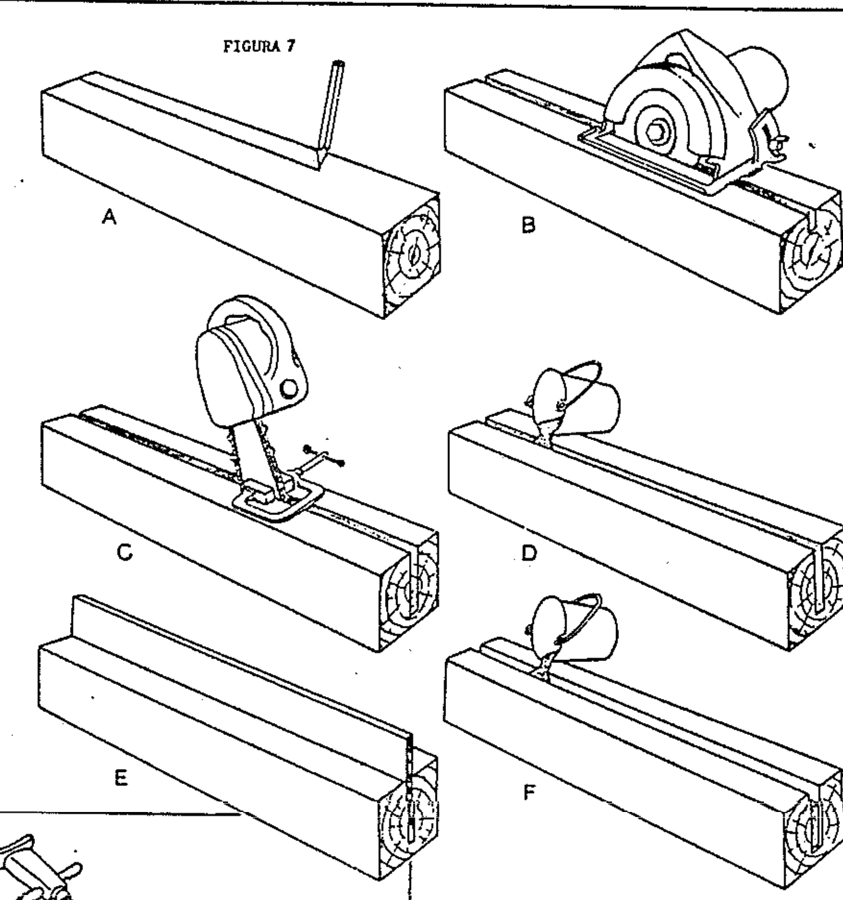
E.— Colocación de la placa de refuerzo.

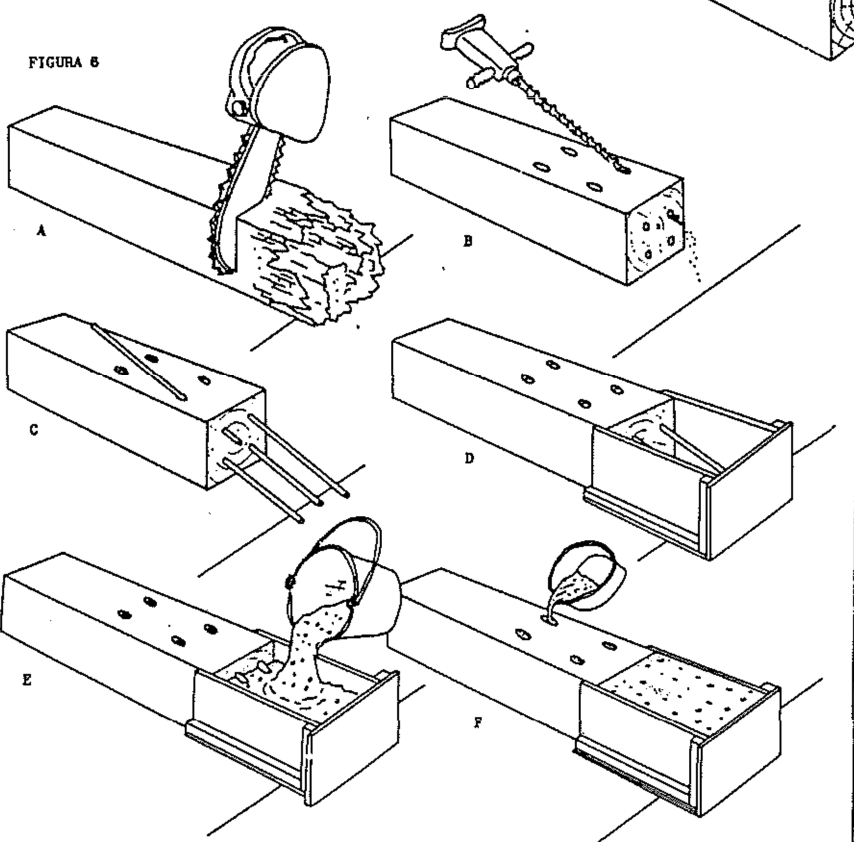
F.— Llenado total con resina epoxi.

4. CONSECUENCIAS O ASPECTOS DERIVADOS DE LA OPCION POR ESTE SISTEMA DE RESTAURACION.

Desde el punto de vista de la restauración, se consigue la conservación de la estructura original con el mínimo de modificaciones. De tal manera que la madera sigue cumpliendo su función resistente practicamente del mismo modo que en su concepción.

En el aspecto económico el costo resulta alto, en general, debido al elevado precio del material básico utilizado, así como la necesidad de una mano de obra especializada. Pero además influyen otros factores que debemos considerar:





Uno de ellos es el propio valor histórico y tecnologico de la estructura. Hay muchos cacos en los que este aspecto predominará sobre cualquier otro. Así mismo la existencia de artesonados en forjados o en cubiertas o bien solados, que deban conservarse, pueden ser los condicionantes que nos lleven a estos sistemas de restauración. Al ser muy limitadas las modificaciones de entorno durante la ejecución de los trabajos, se evitan los elevados costos de desmontado y posterior colocación de estos elementos.

Por otro lado debemos considerar que además del coste del trabajo de consolidación de la estructura, contaremos con otros derivados de esta decisión. El mantenimiento de la madera nos

obligará con seguridad a efectuar un tratamiento químico protector, ya que lógicamente las causas del deterioro de la estructura estarán en los organismos xilófagos.

Antes de proceder a la consolidación de las cabezas de vigas, en el caso de forjados, deberemos revisarlas una por una, con el fin de evaluar los daños y saber cuales necesitan la consolidación. Para lo cual añadiremos las operacones de apertura de la zona del muro que rodea al apoyo de la viga, y su posterior cegado. Igualmente se añaden los trabajos de apeo necesarios.

Frente a esta posibilidad, la opción de una sustitución de la madera por estructuras de hormigón o acero, incluyen el desmontado de la estructura existente, implicando trabajos de desescombro, el coste de la nueva estructura y la reposición total delossolados. Deberemostambién valorar la posible necesidad de mantenimiento de la nueva estructura, como es el caso del acero en ambientes favorables a la oxidación y en lugares de difícil mantenimiento.

A veces la falta de una valoración de la influencia de la nueva estructura sobre el resto de la construcción, puede originar daños en otros elementos. Las causas suelen ser la concentración de cargas, empujes, aumento del peso propio, etc.

Desde el punto de vista del comportamiento mecánico de estos sistemas de consolidación, podemos suponer que la unión entre la madera y el elemento de refuerzo será más efectiva que otras soluciones a base de elementos metálicos atornillados o con pernos, donde la unión es menos rígida y exige una mayor deformación para entrar en carga.

Es importante conocer el comportamiento del sistema bajo la acción del tiempo, con cargas prolongadas, y su resistencia al fuego. Para este Último factor resulta más seguro la instalación oculta de los refuerzos; la madera que los recubre representa un aumento del tiempo de resistencial al fuego.

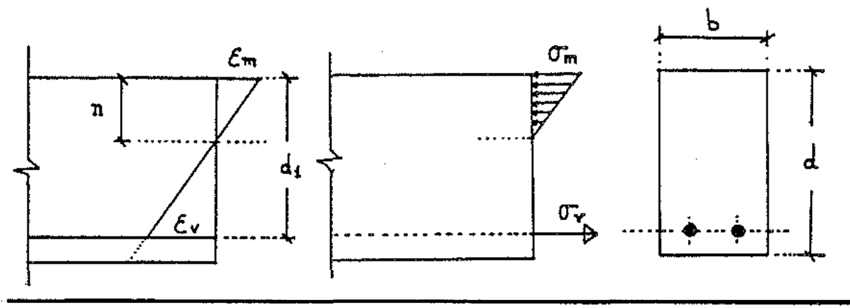
5. PROCEDIMIENTOS DE CALCULO.

Se exponen a continuación los métodos de cálculo que pueden aplicarse en la consolidación de cabezas de vigas. Permiten obtener las dimensiones del refuerzo, necesarias. De modo simplificado. se estudian los casos de utilización de varillas y mortero epoxi, y de placas.

5.1. Varillas de refuerzo y mortero epoxi en la zona perdida.

En el comportamiento mecánico de esta solución el mortero epoxi sustituye a la madera eliminada, trabajando a flexión y cortadura, quedando conectado mediante las varillas a la madera sana. Formando una cierta unidad de trabajo. Las varillas quedan ancladas en la madera a través de la, resina que las rodea, en la longitud adecuada.

Estudiando la sección de contacto de la madera con el mortero epoxi, y admitiendo la hipótesis de deformación plana de la sección:



Siendo:

ϵm = deformación de la madera en la fibra superior.

$\epsilon\nu$ = deformación de las varillas.

Em = módulo de elasticidad longitudinal de la madera.

Ev = módulo de elasticidad de las varillas.

σm = tensión en la fibra superior de la madera. Debera ser menor o igual que la tensión admisible a flexión de la madera.

$\sigma\nu$ = tensión en las varillas. Deberá ser menor o igual que la tensión admisible a tracción de las varillas.

n = profundidad de la fibra sin deformación.

A = sección transversal de las varillas.

$$\frac{\epsilon m}{\epsilon\nu} = \frac{n}{d_1 - n}\ ; \qquad \epsilon m = \frac{\sigma m}{Em}\ ; \qquad \sigma\nu = \frac{\sigma\nu}{E\nu}$$

$$\frac{n}{d_1 - n} = \frac{\sigma m}{\sigma\nu} \cdot \frac{E\nu}{Em} = \frac{\sigma m}{\sigma\nu} \cdot m \qquad \sigma\nu = \frac{(d_1 - n) \cdot \sigma m \cdot m}{n}$$

Llamando a:

m = razón modular = $\frac{E\nu}{Em}$

a = brazo de palanca = $d_1 - \frac{n}{3}$

M = momento producido por la compresión en la madera.

$$M = \frac{\sigma m \cdot b \cdot n \cdot a}{2} = \frac{\sigma m \cdot b \cdot n \cdot (d_1 - n/3)}{2}$$

de donde: $$n = 1,5 \cdot d_1 \pm \sqrt{2,25\, d_1^2 - \frac{6M}{\sigma m \cdot b}}$$

Sustituyendo n por su valor en la siguiente ecuación, obtendremos el valor de $\sigma\nu$

$$\sigma\nu = \frac{(d_1 - n) \cdot \sigma m \cdot m}{n}.$$

Y el momento de las varillas será:

$$M_v = A.\ \sigma\nu \cdot (d_1 - n/3);$$

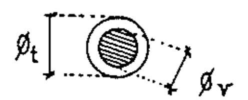
Igualando ambos momentos (Varillas y madera):

$$A.\ \sigma\nu\ (d_1 - n/3) = \frac{\sigma m\ .\ b\ .\ n\ .\ (d_1 - n/3)}{2}$$

de donde obtenemos A:

$$A = \frac{\sigma m \cdot n \cdot b}{\sigma\nu \cdot 2}$$

Longitud de anclaje de las varillas en la madera sana:



Llamando a:

$\phi\nu$ = diámetro de la varilla.

ϕt = diámetro del taladro. ($\phi t = \phi\nu - 8$ mm.)

τm = tensión admisible a cortadura paralela a la fibra de la madera.

rrv = tensión admisible de adherencia tangencial entre resina y varilla.

Para la tensión admisible de adherencia entre la resina epoxi y la madera se tomará el valor de la tensión adm. a cortadura paralela a la fibra de la madera, ya que esta Última es generalmente inferior; por lo que la unión fallaría por la madera.

Si admitimos que la distribución de tensiones es uniforme en la longitud del anclaje, podremos obtener fácilmente los, esfuerzos tangenciales producidos en las superficies

resina - varilla (F_1), y entre resina - madera (F_2),

por unidad de longitud:

$$F_1 = \phi\nu \cdot \pi \cdot \tau r\nu$$

$$F_2 = \phi t \cdot \pi \cdot \tau m$$

Siendo P = $\sigma\nu$. A, el esfuerzo de tracción en una varilla, la longitud de anclaie necesaria será el mayor valor "de los dos siguientes:

$$L_1 = \frac{P}{F_1}; \quad L_2 = \frac{P}{F_2}$$

5.2. Placas de refuerzo.

En este caso la placa o placas que utilicemos deberán tener las dimensiones suficientes para resistir las solicitaciones de la pieza, por sí mismas. Análogamente al caso anterior quedarán conectadas a la madera sana mediante la resina que las recubre.

La filosofía que persigue este sistema consiste en que el refuerzo tenga una capacidad de carga igual a la máxima que tendria la viga en estado sano. Consecuentemente el primer paso es definir el máximo momento de flexión admisible para la sección de la viga:

$$M = \sigma fm \cdot W$$

Siendo:

M = máximo momento en la viga.

σfm = tensión admisible a flexión en la madera, supuesta en perfectas condiciones.

W = módulo resistente de la sección de la viga. Para el caso de sección rectangular sería:

$$W = \frac{b\ d^2}{6}$$. (b = ancho, d = canto de la viga).

σfp = tensión admisible a flexión del material de la placa.

W_p = módulo resistente de la sección de la placa.

Deberá cumplirse que:

$$\sigma fm\ .\ W = \sigma fp\ .\ W_p$$

$$W_p = \frac{t \cdot h^2}{6} = \frac{\sigma fm\ .\ W}{\sigma fp}$$

De donde podemos obtener t y h:

$$t = \frac{6 \cdot W_p}{h^2} \qquad h = \sqrt{\frac{6 \cdot W_p}{t}}$$

Llamando a:

t = espesor de la placa. Con un mínimo de 5 mm.

h = canto de la placa. Debe ser tan profundo como sea posible, (h = d – 20 mm).

Si la viga tiene un ancho superior o igual a 150 mm., es recomendable utilizar al menos 2 placas paralelas. En, estos casos la carga se repartira entre ambas. El eje neutro de la viga deberá coincidir con el de la placa. Las recomendaciones de recubrimientos mínimos de madera atienden a razones de resistencia al fuego.

Comprobación del esfuerzo cortante en la placa:

Para el caso de una viga biapoyada el cortante máximo Q, en función del momento máximo M, será:

$$M = \frac{q \cdot l^2}{8}; \quad Q = \frac{q \cdot l}{2} \Longrightarrow$$

$$\Longrightarrow Q = \frac{4 \cdot M}{l}$$

De donde la tensión tangencial máxima en la placa sera

$$\tau_p = \frac{3}{2} \cdot \frac{Q}{t \cdot h} \Longrightarrow \tau_p = \frac{6 \cdot M}{l \cdot t \cdot h}$$

Siendo:

τ▼ – tensión máxima de cortadura en la olaca.

M = momento máximo = = σfm . W (Madera).

l = luz de la viga.

t = espesor de la placa.

h = canto de la placa.

Lamando

$r_p$adm a la tensión

admisible a cortadura del material de la placa, podemos esta-

blecer la siguiente condición a cumplirse:

$$\tau_p \leqslant 0{,}5 \cdot \tau_{p\,adm.}$$

Comprobación de los factores de pandeo local (K_c) y lateral (K_b) de la placa:

La placa de refuerzo resistirá los esfuerzos derivados del pandeo, si la tensión de flexión existente es inferior a la tensión admisible a flexión del material corregida por un coeficiente reductor:

K_c y K_b:

$$K_c = \frac{20 \cdot t}{h}; \quad K_b = 0{,}5 + \frac{h}{L_a + L_b}$$

Si estos coeficientes son inferiores a la unidad, deberá cumplirse:

$$\sigma_f \leqslant \sigma_{fp} \cdot K_c; \; \sigma_f \leqslant \sigma_{fp} \cdot K_b$$

Siendo:

σ_f = tensión de flexión en la placa. $= \dfrac{M}{W_p} = \dfrac{\sigma_{fm} \cdot W}{\frac{t \cdot h^2}{6}}$

σ_{fp} = tensión admisible a flexión del material de la placa.

L_a y L_b = Ver figura 2.

Longitud de conexión en la madera sana:

Esta conexión tiene la función de transmitir los esfuerzos desde el refuerzo a la madera. Lógicamente su importancia es crucial, y no contaremos como longitud efectiva la zona correspondiente a la madera en mal estado o dudoso. La capacidad de conexión debe ser igual o superior a la capacidad de la madera sana.

La longitud necesaria de anclaje, será función de las dimensiones de la sección de la viga y su luz, (quedando aquí implícita la carga), de las tensiones admisibles de la madera, adherencia de la resina epoxi utilizada y del canto de la placa.

BIBLIOGRAFIA:

- **Fernández Cánovas,** M. "Los resinas epoxi en la construcción''. Instituto **Eduardo Torroja** de la **Construcción** y del Cemento. 1981.
- Stumea, **Paul.** "The *W. E. R.— System* Manual. ***Structural Rehabilitation*** of Deteriorated ***Timber''***. **Association** for Preservation **Technology.** 1979 Ottawa, Canadá.
- A. P. T. Bulletin, Vol. VII, nº 3, 1975 Ottawa, Canadá.
- ***"Bureau*** Beta. Manual del Sistema Beta''. Restauración de la madera.
- Toth, L. W. ***"Propiedades*** de las resinas epoxi reforzadas con fibra de uidrio o temperatura de *20º K''*. Revista Plásticos Modernos, Diciembre 1965.
- **Halquist,** A. "An inuestigation on epoxy and polyester ***resin*** mortars as ***jointing*** material''. Bulletin RILEM. Diciembre 1967.
- **Tamavo.** F. "Resinas epoxi en la ***conservación y restauración de*** obras de ***arte''.*** **Informes y trabajos** del I. C. C. R., **nº** 11, 1970.
- **Andreis,** S., y **Stanescu,** A. "Lea ***deformations sous*** chargea de courte et ***longue durcé des milanges*** a base de ***résines*** epoxydes'' RILEM, Materiales y **Estructuras.** Julio - Agosto 1975.
- **Kriegh,** J. D. ***"Arizon*** Slant Shear Test: Amethod ***to*** determine epoxy bond strength': A. C. **I. Journal.** Julio 1976.
- Van Wyk, W. J. "The ***durability*** of steel-reinforced ***end-joints*** in timber ***beams''*.** **Holzforschung, Berlin.** vol. 33, **nº** 4, aoüt 1979.
- SHELL. "Manual técnico de resinas ***Shell*** Epikote en Construcción y Obras públicas': Mayo 1978.
- **Moers.** F. ***"Anschluzz*** mit ***eingeleimtem*** gewindestaben'' **(Ensamblaje con** la ayuda de **varillas roscadas encoladas). Bauen mit Holz, Karlsruhe, 83º. année, nº** 4, **avr.** 1981.